

褐牙鲆水中阻力的初步研究

李文涛, 张秀梅, 高天翔, 井爱国

(中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003)

摘要:鱼类在水中游泳时,需要克服水的阻力从而需要消耗一定的能量。鱼类依鱼种、大小以及形态特征的差异,在同样的水流条件或游泳速度下,其水中阻力也不相同。本研究通过对褐牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)在垂直循环水槽中进行游泳阻力测试实验,分别用3种特征面积(横截面积、湿表面积和鱼体体积的 $2/3$ 次方),获得褐牙鲆3种不同的阻力系数。经比较分析发现,在雷诺数 R_e 为 $2.7 \times 10^4 \sim 1.91 \times 10^5$ 时,采用湿表面积作为褐牙鲆的特征面积获得的阻力系数的平均值为0.020,此时标准差最小,仅为0.00076。而分别用横截面积和鱼体体积的 $2/3$ 次方时获得的阻力系数的标准差相对较大。因此,用褐牙鲆的湿表面积计算得到的阻力系数更适合于该种鱼类个体水中阻力的研究。

关键词:褐牙鲆;流体阻力;特征面积;阻力系数

中图分类号:Q959.486 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-8737-(2004)03-0231-06

鱼类游泳时水流对鱼体的作用力不仅对鱼类的分布和行为有重要的影响,还影响到鱼类能量的获取、鱼类的形态和游泳的姿态^[1]。多数鱼类要依靠游泳来进行洄游、捕食或逃避敌害。鱼类在游泳过程中要克服水的阻力,而鱼类在水中所受到的阻力不仅与游泳速度有关,还与鱼体形态有关。不同形态的鱼类,其水中阻力一般是不相同的。而通过估算鱼类游泳时的阻力,可以了解鱼类的游泳行为、游泳时的能量消耗和鱼体形状的进化,从而可以进一步了解鱼类的行为和生态学^[1]。

水生动物在水中的阻力与其游泳中能量的代谢、游泳行为、动物形态对其栖息环境的适应性等有密切关系,因此,研究人员曾分别采用各种方法研究水生动物在水中的阻力^[1-6]。作为经济价值较高的理想养殖品种,20世纪90年代以来,褐牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)的池塘养殖、工厂化养殖和网箱养殖正得到迅速发展,人们关于褐牙鲆的生理、遗传育种、养殖技术等方面做了大量研究^[7-9],而关于褐牙鲆的水中阻力和游泳能力等方面的研究,目前鲜有报道。本实验测量了褐牙鲆在不同流速的水流中所受到的阻力,以期对褐牙鲆的游泳行为学和行为生态学等方面的研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用褐牙鲆采自威海华信海珍品养殖公司,全长为9.8~19.1 cm。实验前,将鱼体尾动脉血管内注入适量95%的乙醇使鱼体麻醉,并注意避免乙醇的溢出而可能破坏鱼体表面的黏膜。试验用的褐牙鲆均经过测量、称重,取得其相应的参数资料。鱼体阻力测量完毕后,测量鱼体的最大横截面积、鱼体湿表面积和体积。所得的数据见表1。

在本研究中,测量了麻醉状态的鱼在流水中所受到的阻力。由于鱼处于麻醉状态,仍然有呼吸,而且鱼体柔软,因而本实验测得的阻力包括了死鱼实验时所不能测量到的水流通过鱼鳃时的阻力,并且还包含了软的鱼体随水流摆动时对其阻力的影响。

1.2 实验方法

1.2.1 实验水槽 实验在中国海洋大学水产学院鱼类行为学实验室的垂直循环回流水槽(大连汇新海洋科技发展有限公司制造)中进行,见图1。

回流水槽的实验观察区长度为1.0 m,实验区水路规格为100 cm×25 cm×25 cm。在回流水槽中,通过调整回流水槽的电机频率,可在0.3~2.0 m/s范围内连续调节水流流速。在水槽中整流格栅的作用下,水流呈相对稳定的层流状态。

收稿日期:2003-09-30; 修订日期:2004-01-02.

基金项目:国家“863”高技术计划资助项目(2001AA623030);国家自然科学基金项目(30070593)。

作者简介:李文涛(1968-),男,博士研究生,从事鱼类行为生理、生态学研究。

通讯作者:张秀梅. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn

表1 实验鱼的形态学测量数据

Table 1 Morphometric data for each of the ten Japanese flounders A-J

项目 Item	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
全长/cm Total length	191.00	191.00	184.00	16.00	167.00	104.00	115.00	105.00	105.00	98.00
重量/g Weight	59.59	52.47	52.76	31.20	31.81	9.32	13.99	9.40	10.03	7.18
湿表面积/cm ² Wetted surface area	204.50	206.03	175.61	132.40	157.99	66.31	88.53	67.37	66.87	61.49
最大横截面积/cm ² Cross sectional area	6.05	6.14	4.32	4.61	4.10	2.24	2.61	2.05	1.98	1.52
体积/cm ³ Volume ^{2/3}	9.52	13.39	13.42	9.49	9.61	4.25	4.42	4.30	4.47	3.58

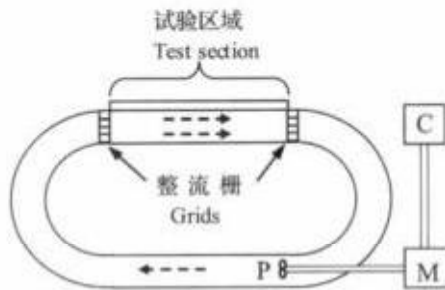


图1 垂直循环回流水槽示意图

C - 流速控制面板; M - 变频电机; P - 螺旋桨。

Fig. 1 Schematic drawing of vertical recirculating water flume

C - Control panel of motor; M - Frequency-adjustable motor; P - Propeller.

1.2.2 阻力测量 本实验中,采用了一种自行设计的鱼体阻力传感器(图2)。该传感器的设计是利用杠杆原理,利用装有转动轴的杠杆将作用在水平方

向上的鱼体阻力转换为垂直方向上的力。另外,在实验中鱼体的正上方悬挂一金属平衡杆,并在实验时插入鱼体内,以防止在水流的作用下鱼体可能产生的转动或摇摆。在实验时,将该阻力传感器固定在垂直循环回流水槽上部的适当位置。当垂直循环回流水槽中产生水流时,装置浸在水中的部分会产生阻力。其中鱼体阻力 F_D 作用在转动轴下方垂直距离为 L_1 的位置上,产生的力矩为 $F_D L_1$ 。同时传感器的竖杆浸在水中的部分以及在鱼体上的平衡杆也会产生装置阻力 F_0 (其力臂为 L_0),产生力矩为 $F_0 L_0$ 。在鱼体阻力 F_D 和装置阻力 F_0 的作用下,该杠杆产生转动的趋势,而杠杆的转动则使水平杆压在水平放置的天平上,从而使天平产生一在垂直方向上与该阻力力矩相平衡的力矩的力 F_2 ,其作用点距转动轴的水平距离为 L_2 ,如图2所示。当达到平衡状态时,这3个力矩之和为0。这样鱼体阻力便

可以用下式求得: $F_D = \frac{F_2 L_2 - F_0 L_0}{L_1}$

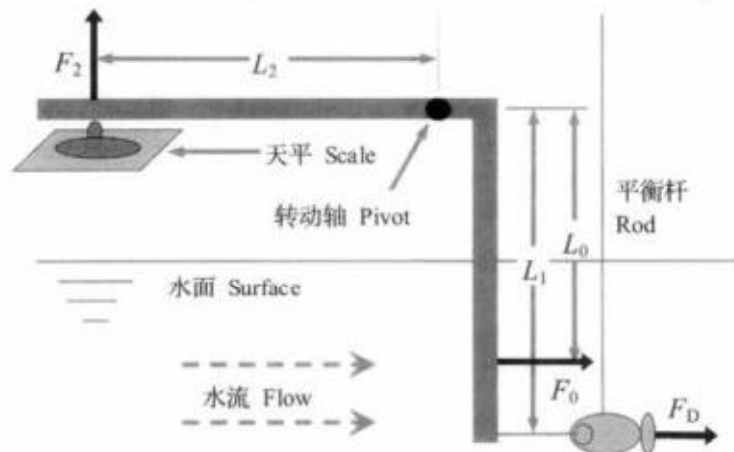


图2 鱼体阻力传感器示意图

 F_0 - 装置阻力; F_2 - 天平托力; F_D - 鱼体阻力; L_0 - 装置阻力力臂; L_1 - 鱼体阻力力臂; L_2 - 天平托力力臂。

Fig. 2 Schematic drawing of the drag force transducer

 F_0 - Equipment drag; F_2 - Supporting force of scale; F_D - Fish drag; L_0 - The arm of equipment drag; L_1 - The arm of fish drag; L_2 - The arm of supporting force of scale.

1.2.3 阻力系数计算 在实验中,选用10条褐牙鲆分别在15个流速(0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.55、0.60、0.65、0.70、0.75、0.80、0.85、0.90、0.95、1.0 m/s)下测量它们的阻力。而对于每1尾鱼,可以计算出在每一流速下的阻力系数。而鱼体的阻力系数通常可以用下式计算^[6]:

$$C_D = \frac{F_D}{1/2\rho V^2 A} \quad (1)$$

其中, C_D 是阻力系数,是一无量纲的量; F_D 是鱼体阻力,单位是牛顿; V 是流体速度,单位是 m/s, A 是特征面积,单位是 m^2 ; ρ 是流体密度,单位是 kg/m^3 。

在计算鱼体阻力时,通常可以使用3种特征面积,分别是鱼体截面积、鱼体湿表面积和鱼体体积的2/3次方^[10],这些鱼体特征面积值见表1。因此,在本研究中,分别采用3种特征面积来计算鱼体的阻力系数,并通过对这些阻力系数进行分析比较,找出更适合于褐牙鲆阻力估算的特征面积类型以及利用该特征面积所得到的阻力系数的平均值。其中,鱼体的截面积要通过横截鱼体并通过测量截面面积获得,采用鱼体截面最大处的面积值;由于褐牙鲆的体形扁平,其湿表面积采用体表贴纸的办法获得;鱼体的体积则通过称量鱼体在水中的重量,然后计算鱼体所受到的浮力,再转换计算获得。

2 结果

表2 褐牙鲆采用3种不同的特征面积时所对应的阻力系数

Table 2 Drag coefficients of Japanese flounder referenced to three delegated areas

组别 Group	C_{ds}	C_{dl}	C_{dv}	雷诺数 ($\times 10^5$) R_e
A	0.020 ± 0.00072	0.70 ± 0.026	0.31 ± 0.011	0.45 - 1.62
B	0.019 ± 0.0013	0.63 ± 0.043	0.29 ± 0.020	0.53 - 1.91
C	0.020 ± 0.0060	0.82 ± 0.240	0.26 ± 0.079	0.52 - 1.81
D	0.019 ± 0.0024	0.55 ± 0.070	0.27 ± 0.034	0.45 - 1.60
E	0.020 ± 0.0065	0.78 ± 0.250	0.33 ± 0.110	0.47 - 1.67
F	0.021 ± 0.0038	0.61 ± 0.110	0.32 ± 0.059	0.29 - 1.04
G	0.022 ± 0.0028	0.74 ± 0.096	0.34 ± 0.044	0.32 - 1.15
H	0.021 ± 0.0032	0.67 ± 0.100	0.32 ± 0.049	0.29 - 1.05
I	0.021 ± 0.0074	0.71 ± 0.250	0.31 ± 0.110	0.29 - 1.05
J	0.020 ± 0.0047	0.82 ± 0.190	0.35 ± 0.080	0.27 - 0.98
平均值 Mean value	0.020 ± 0.00076	0.70 ± 0.094	0.31 ± 0.028	

注:阻力系数 C_{ds} , C_{dl} 和 C_{dv} 的平均值后为一个标准差 (± 1 SD), 每1尾鱼的阻力系数的平均值都是分别在15个流速(从0.3 m/s到1.0 m/s, 速度间隔为0.05 m/s)下获得的。

Note: The values of C_{ds} , C_{dl} and C_{dv} are means ± 1 SD. The mean value of drag coefficients of each fish is gained at 15 flow velocities (from 0.3 m/s to 1.0 m/s, at a 0.05 m/s velocity interval).

2.1 鱼体阻力

如图3所示,鱼体阻力随着水流速度的增加而迅速增加。而根据流体力学的理论,物体阻力与物体所处的周围流体的速度的平方成正比。图3中显示的阻力-速度曲线与该理论基本相符。

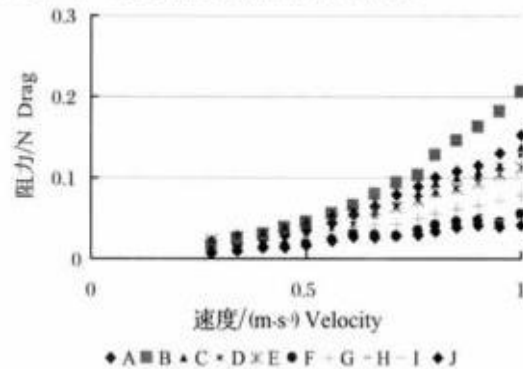


图3 鱼体阻力与水流速度的关系

Fig. 3 Relationship between drag force and flow velocity

2.2 鱼体阻力系数

利用式(1)对鱼体阻力系数进行计算,分别对应3种特征面积,得到每1尾鱼在每一速度下的阻力所对应的3个阻力系数,并最后求得每1尾鱼在本实验中的阻力系数平均值(表2)。

从表2可以看出,由于所采用的特征面积不同,对每一尾鱼所得到的3个阻力系数有很大的差异。而采用同种特征面积,通过不同个体所得到的同种阻力系数也有一定的差异。分析除实验中的误差外,还要归因于不同个体之间的形态差异。但由于同种鱼的鱼体形状具有一定的相似性,因此不同个体的同种阻力系数之间的差异并不是很大。其中,对应于褐牙鲈湿表面积的阻力系数的平均值 C_{ds} 为0.020,标准差为 ± 0.00076 ;对应于鱼体横截面积的阻力系数的平均值 C_{df} 为0.70,标准差为 ± 0.094 ;对应于鱼体体积的 $2/3$ 次方的阻力系数的平均值 C_{dv} 为0.31,标准差为 ± 0.028 。

2.3 鱼体阻力计算

通过对这10个个体所获得的阻力系数值进行比较;可以看出,采用褐牙鲈的湿表面积计算得到的褐牙鲈的阻力系数标准差最小,标准差与阻力系数平均值的比为0.038,而采用鱼体横截面积和鱼体体积的 $2/3$ 次方计算阻力系数时的该比值分别为0.13和0.09。可以看出,在本实验中采用鱼体湿表面积计算得到的鱼体阻力系数的标准差最小。因

此,利用本实验获得的参照鱼体湿表面积的阻力系数来进行褐牙鲈阻力估算比较准确。这样,褐牙鲈在水中受到的阻力就可以采用下式进行计算^[11-13]:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A \quad (2)$$

式中, C_D —褐牙鲈阻力系数0.02; ρ —水的密度(kg/m^3); V —水流速度(m/s),鱼在水中相对于水的速度; A —鱼体湿表面积(m^2)。

根据本实验中10尾褐牙鲈的体长与鱼体湿表面积的关系,可以得到一个鱼体全长 L 与鱼体湿表面积 A 的关系公式(相关指数 $R^2=0.9901$):

$$A = 6787.1L^{2.9134} \quad (3)$$

因此,式(2)就可以写成:

$$F_D = 67.871\rho V^2 L^{2.9134} \quad (4)$$

那么,已知褐牙鲈全长 L 就可以根据式(4)计算出该褐牙鲈在一定水密度 ρ (kg/m^3)和流速 V (m/s)下的水阻力。图4中曲线分别是当褐牙鲈全长分别为0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 m时,根据式(4)计算得到的鱼体阻力与水流速度的关系曲线。

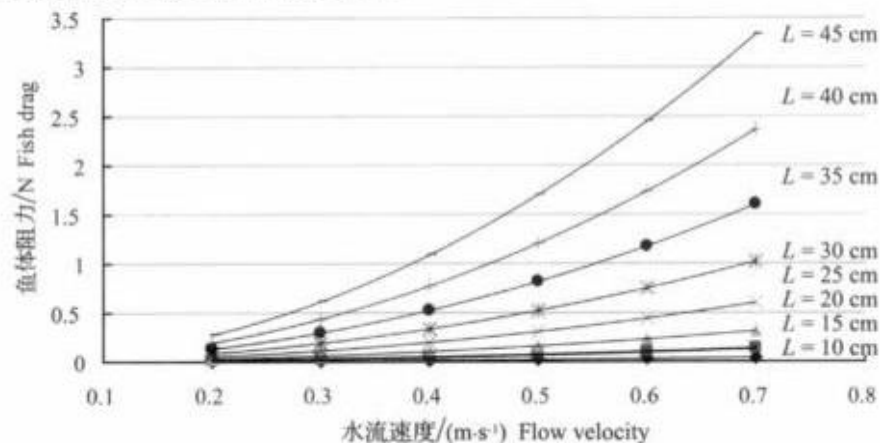


图4 根据公式(4)得到的鱼体阻力与水流速度的关系曲线

Fig. 4 The relationship between calculated drag forces and the flow velocities using equation (4)

3 讨论

测量水生动物阻力的方法有很多种,既可在风洞,又可在水槽中进行,而且阻力可以采用更精密的拉力传感器进行测量^[2]。而对于生态学者来说,一种简便易行的实验方法更具有应用价值,用本实验方法测量并计算得到的鱼体阻力也能够满足要求。

根据流体力学的相关理论,阻力系数是雷诺数 R_e 的函数。而雷诺数 R_e 可以用下式计算:

$$R_e = VL/\nu$$

其中, V 为流体的速度(m/s); L 为特征长度,可用鱼体最大的垂向或横向尺度(m); ν 为运动粘性系数(本实验中,水温为 20°C , ν 的值为 $6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[5])。

根据前人所获得经验数据可知,对某些特定形状的物体来说(比如圆柱体和球体),虽然阻力系数随着雷诺数的增加而变化,但通常在某一雷诺数范围内,阻力系数保持基本恒定(比如圆柱体在雷诺数在 $10^4 \sim 3 \times 10^5$ 时,阻力系数保持在 1.0 附近基本不变)。本实验中,在测量每 1 尾鱼的阻力时,随着流速的增加,雷诺数也在增加,其雷诺数在 $2.7 \times 10^4 \sim 1.91 \times 10^5$ 内变化(表 2)。从这些阻力系数的标准差可以看出,对应于每 1 尾鱼,利用不同雷诺数下获得的同类型的阻力系数的差别并不是很大,这说明实验涉及的雷诺数范围内,鱼体阻力系数基本保持不变。因此,通过实验获得的鱼体阻力系数在该雷诺数范围内是比较可信的。

本实验研究中,通过采用 3 种特征面积,获得 3 种鱼体阻力系数。由于褐牙鲆体形扁平,体表面积比较容易计算,而且计算精度比较高,因而用体表面积计算得到的阻力系数估算褐牙鲆阻力比较合适。这种方法同样适用于体形扁平的其他鲆鲽鱼类。而对于纺锤体型的鱼类,体表面积计算比较复杂,获得的体表面积值精度不高,因而用鱼体横截面积和鱼体体积的 $2/3$ 次方计算鱼体阻力系数更合适^①。

本实验所测得的是没有鱼体摆动且鱼体保持水平状态时的阻力,而按照 Anderson 等^[14]人的研究结果,游泳中的鱼类由于伴随着身体的摆动,因而所受到的水阻力比鱼体僵直不动时的阻力要大。因此,用本方法所测得的鱼体阻力系数来推算鱼体水中阻力时所得到的阻力值可能比实际值要小。今后,进一步的实验要测量与水平面呈不同夹角的鱼体阻力,以便能更精确地推算鱼体以不同姿态游泳时的能量消耗。

参考文献:

- [1] Stelle L L, Robert W B, Andrew W. Trites, Hydrodynamic drag in stellar sea lions (*Eumetopias jubatus*) [J]. The Journal of Experimental Biology, 2000, 203: 1 915 - 1 923.
- [2] Loudon C, Zhang J. Measuring drag without a force transducer: a terminal velocity assay [J]. Funct Ecol, 2002, 16: 268 - 272.
- [3] Weissburg M J, James C P, Smee D L. Fluid mechanics produces conflicting constraints during olfactory navigation of blue crabs, *Callinectes sapidus* [J]. J Exper Biol, 2003, 206: 171 - 180.
- [4] Johnson T P, Cullum A J, Bennett A F. Partitioning the effects of temperature and kinematic viscosity on the c-start performance of adult fishes [J]. J Exper Biol, 1998, 201: 2 045 - 2 051.
- [5] Fish F E. Comparative kinematics and hydrodynamics of odontocete cetaceans: morphological and ecological correlates with swimming performance [J]. J Exper Biol, 1998, 201: 2 867 - 2 877.
- [6] Haefner J W, Bowen M D. Physical-based model of fish movement in fish extraction facilities [J]. Ecol Mod, 2002, 152: 227 - 245.
- [7] 刘云,姜国良,郑家声. 牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)消化道形态学及组织学研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(4): 548 - 554.
- [8] 张秀梅,朱杰,高天翔. 褐牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)受精卵及仔稚鱼生理生态学研究进展[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(4): 495 - 500.
- [9] 陈四清,于东祥,马爱军. 牙鲆饲料喂量颗粒饲料的应用研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(7): 59 - 61.
- [10] Hirata, K. Development of fish robots at national marine research institute koichi HIRATA [J]. Design Engineering, 2003, 38(6): 29 - 37.
- [11] Hind A T, Gurney W S C. The metabolic cost of swimming of swimming in marine homeotherms[J]. J Exper Biol, 1997, 200: 531 - 542.
- [12] Walker J A. Ecological morphology of lacustrine threespine stickleback *Gasterosteus aculeatus* L. (Gasterosteidae) body shape [J]. Biol J Linn Soc, 1997, 61: 3 - 50.
- [13] Drucker E G, Lauder G V. A Hydrodynamic analysis of fish swimming speed: wake structure and locomotor force in slow and fast labriform swimming [J]. J Exper Biol, 2000, 203: 2 379 - 2 393.
- [14] Anderson E J, Megillis W R, Grosenbaugh M A. The boundary layer of swimming fish [J]. J Exper Biol, 2001, 204: 81 - 102.
- [1] Stelle L L, Robert W B, Andrew W. Trites, Hydrodynamic drag

① Li WT, Zhang XM, Gao TX, et al., The Measurement of the Water Drag on *Sebastes Schlegeli*, 待发表.

Water drag of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*

LI Wen-tao, ZHANG Xiu-mei, GAO Tian-xiang, JING Ai-guo

(Fishery College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: The hydrodynamic forces encountered by aquatic animals are of general interest in understanding the functional design of them and also affect their energetic requirements and therefore their body morphology and swimming patterns. They are also significantly ecological because they can affect aquatic animals' distribution, behavior or dispersal. The hydrodynamic drag forces act on the fish body when fish is swimming. Body size and morphology of fish vary among different individuals and species, so the drag forces acting on their bodies differ even in the same hydrodynamic conditions or swimming velocities. A recirculating water flume was used to generate steady flow relative to the fish specimen and the water drag acting on it. Using the principle of a bell crank lever, we designed a drag force transducer. The drag force transducer changed the horizontal drag into a vertical one and the vertical force was displayed on an electronic scale, a component of the drag force transducer. The drag force acting on fish specimen was calculated by summing the moments about the pivot point of the bell crank lever. Ten Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) were experimented in a recirculating water flume. The drag forces acting on each fish specimen were measured at fifteen velocities (0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.0 m/s) with the self-designed drag force transducer and then the drag coefficient could be calculated for each individual at each velocity. The drag coefficient calculated from measured drag data depends on how A is defined. In this case, we employed the cross-sectional area, the wetted surface area and the two-thirds powers of volume as the reference area. From the measured data we obtained three kinds of drag coefficients C_{dA} (referenced to the cross-sectional area), C_{dS} (referenced to the wetted surface area) and C_{dV} (referenced to the two-thirds powers of volume). For the three kinds of drag coefficients the mean values were 0.70 for C_{dA} , 0.020 for C_{dS} and 0.31 for C_{dV} , with standard deviations of 0.094, 0.000 76 and 0.028, respectively (with the Reynolds number ranging from 2.7×10^4 to 1.91×10^5). The results showed that each drag coefficient referenced to different representative areas was distinct from the other two. Among the three kinds of drag coefficients, the standard deviation of the drag coefficient referenced to the wetted surface area is the least. So using wetted surface area to reckon water drag on Japanese halibuts is more suitable than other two kinds of drag coefficient.

Key words: *Paralichthys olivaceus*; hydrodynamic drag force; representative reference area; drag coefficient

Corresponding author: ZHANG Xiu-mei. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn